

文章编号：2095-4980(2022)08-0817-07

## 针对非合作目标的调频步进编码波形设计方法

张彦，叶春茂<sup>\*</sup>，鲁耀兵，李璋峰

(北京无线电测量研究所，北京 100854)

**摘要：**雷达对于非合作目标的探测，存在目标微小与速度未知两大困难，而相干积累的方法需要准确探测目标速度，并进行速度补偿，实际应用过程中效果受限。针对此问题提出了一种调频步进编码波形设计方法，可以在速度未知情况下脉间积累，同时在准确测量速度后宽带合成。首先研究线性调频子脉冲的距离速度耦合特性，通过波形设计抵消脉间目标运动成像位置变化；然后研究调频步进编码波形的宽带合成技术，使所得的高分辨一维距离像无距离混叠。最后，数值仿真实验验证了所提出波形的优势与应用价值。

**关键词：**调频步进波形；距离速度耦合；宽带合成信号；高分辨距离像

中图分类号：TN957

文献标志码：A

doi：10.11805/TKYDA2020352

## Design method of coded stepped frequency chirp waveform for non-cooperative target

ZHANG Yan, YE Chunmao<sup>\*</sup>, LU Yaobing, LI Zhangfeng

(Beijing Institute of Radio Measurement, Beijing 100854, China)

**Abstract:** There are two typical difficulties in radar detection of uncooperative targets: weak target and unknown velocity. Coherent pulse integration method is used in detecting the weak target, but it needs to detect the target velocity accurately and compensate the velocity, therefore it is limited in practical application. A design method of coded stepped frequency chirp waveform is proposed, which can integrate the pulse when the velocity is unknown and synthesize the wideband after the velocity is measured accurately. Firstly, the range velocity coupling characteristic of Linear Frequency Modulation (LFM) is studied, and the range migration is compensated by waveform parameter design. Then, the wideband synthetic technology of the stepped frequency chirp waveform is studied in order to get high resolution range profile without range ambiguity. Finally, simulation experiments validate the advantages and practical value of the proposed waveform.

**Keywords:** stepped frequency chirp waveform; range velocity coupling; synthetic wideband signal; high resolution range profile

雷达针对非合作目标的探测，主要困难在于所探测的目标微小与速度未知。目标微小使得雷达成像信噪比低的同时，雷达距离分辨率不足，无法提取精细目标特征；目标速度未知，使得速度补偿不准确，导致脉间积累损失。因此需要一种大宽带波形，既可以有效分辨微小目标，又可以在目标速度未知情况下快速完成脉间积累，提高检测概率。调频步进编码波形是一种常见的宽带波形，脉内采用线性调频子脉冲，脉间采用频率步进编码的方式，瞬时带宽不大，易于工程实现，可以通过子脉冲脉压与脉间宽带合成处理获得高分辨一维距离像<sup>[1]</sup>。目前，对于调频步进编码波形的研究取得了一些进展，包括抑制成像后旁瓣电平，如文献[2-3]利用相关特性研究了频率分布对频率步进雷达成像的影响，文献[4]通过设计重叠频带与利用相反调制频率的线性调频子脉冲形成低距离旁瓣，文献[5-6]利用模糊函数设计了自适应频率步进波形以提高多散射点分辨率；提高步进编码波形测速精确度，如文献[7]设计了脉冲重复频率参差的调频步进波形进行测速补偿，文献[8-9]采用了互补编码的方式脉间积累提高测速精确度；以及新的信号处理方法，如文献[10]在不改变采样速率的前提下引入最小二

收稿日期：2020-07-27；修回日期：2020-08-21

\*通信作者：叶春茂 email:danielgodman@163.com

乘估计方法减少了对频率步进量的限制，文献[11]针对调频步进波形中的子带混叠冗余问题设计了一种信号处理滤波器，文献[12]将去斜处理方法扩展到了伪码线性调频频率步进波形中，文献[13]设计调频步进波形参数完成了二维成像处理，但都没有充分利用脉间步进频率编码特性，对脉内距离速度耦合进行补偿。文献[14]为了补偿线性调频脉冲波形的距离速度耦合特性，提出了改变脉间载频从而利用脉间目标位置变化抵消距离速度耦合的波形设计方法，但没有进一步研究载频变化后的宽带合成。受此启发，本文提出了一种调频步进编码波形设计方法，综合考虑脉内线性调频子脉冲距离速度耦合与脉间目标运动成像位置变化的影响。所设计的波形在速度未知情况下即可进行快速脉间积累提高信噪比，速度估计后可进行宽带合成形成高分辨一维距离像，且无距离混叠。

## 1 调频步进编码波形

### 1.1 定义

调频步进编码波形脉内采用线性调频子脉冲，脉间采用频率编码的方式，发射波形表达式为：

$$s_0(t) = \sum_{i=0}^{N-1} \text{rect}\left(\frac{t-iT_r}{T_p}\right) \exp[j\pi K(t-iT_r)^2] \exp(j2\pi f_i t) \quad (1)$$

式中：矩形窗函数  $\text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) = \begin{cases} 1, & -\frac{T_p}{2} \leq t \leq \frac{T_p}{2} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$ ； $K = \frac{B_p}{T_p}$  为线性调频斜率； $T_p$  为子脉冲持续时间； $B_p$  为子脉冲带宽； $T_r$  为脉冲重复时间； $f_i$  为各子脉冲载频即频率编码。若  $f_i = f_0 + i\Delta f$ ，则发射波形为传统调频步进波形， $\Delta f$  为脉间步进频率。

设雷达回波的双程时延为  $\tau_i$ ，目标与雷达间径向速度为  $v$ ，远离雷达方向为正，电磁波传播速度为  $c$ ，则回波信号表示为：

$$s_r(t) = \sigma \cdot s_0[\alpha(t-\tau_i)] \quad (2)$$

式中： $\sigma$  为反射系数； $\alpha = \frac{c-v}{c+v}$  为回波尺度调制因子。忽略反射系数，则调频步进编码波形回波表达式为：

$$s_r(t) = \sum_{i=0}^{N-1} \text{rect}\left(\frac{t-iT_r-\tau_i}{T_p}\right) \exp[j\pi K\alpha^2(t-iT_r-\tau_i)^2] \exp[j2\pi f_i \alpha(t-\tau_i)] \quad (3)$$

对于调频步进编码波形的回波，通常的处理方式为，将各子脉冲回波与各载频进行下变频处理到基带，经过采样，然后进行子脉冲脉压与脉间宽带合成处理，获得高分辨距离像。因此，分别对子脉冲脉压与脉间宽带合成原理展开分析。

### 1.2 线性调频子脉冲脉压

由于子脉冲带宽有限，可忽略脉内尺度调制效应，调频步进编码波形回波简化为：

$$s_r(t) \approx \sum_{i=0}^{N-1} \text{rect}\left(\frac{t-iT_r-\tau_i}{T_p}\right) \exp[j\pi K(t-iT_r-\tau_i)^2] \exp[j2\pi f_i \left(1 - \frac{2v}{c}\right)(t-\tau_i)] \quad (4)$$

下变频到基带表达式为：

$$x(t) = \sum_{i=0}^{N-1} \text{rect}\left(\frac{t-iT_r-\tau_i}{T_p}\right) \exp[j\pi K(t-iT_r-\tau_i)^2] \exp[j2\pi f_i(-\tau_i)] \exp[j2\pi f_{mi}(t-\tau_i)] \quad (5)$$

式中  $f_{mi} = -(2v/c)f_i$  为各载频下的速度调制频率。

子脉冲回波匹配滤波结果为：

$$y_i(t) = \left[1 - \left|\frac{(t-\tau_i)}{T_p}\right|\right] \cdot \text{sinc}\left\{\pi[f_{mi} + K(t-\tau_i)][T_p - |(t-\tau_i)|]\right\} \cdot \exp[j\pi f_{mi}(t-\tau_i)] \exp[j2\pi f_i(-\tau_i)] \quad (6)$$

式中  $\text{sinc}(x) = \frac{\sin x}{x}$ 。可以看出，速度带来了目标距离偏移量与幅值损失，目标位置从  $x_i = \frac{c}{2}\tau_i$  偏移到了  $x_i = \frac{c}{2}\left(\tau_i - \frac{f_{mi}}{K}\right)$  处，幅值从 1 下降为  $1 - \left|\frac{f_{mi}}{B_p}\right|$ 。

若在相干处理间隔内，目标满足匀速运动，则对于第*i*个子脉冲，目标偏移后位置为：

$$x_i = \frac{c}{2} \left( \tau_0 - \frac{f_{mi}}{K} \right) + ivT_r \quad (7)$$

可以通过波形参数设计，使得每个子脉冲偏移后的目标出现位置相同，从而在速度未知情况下完成非相干积累，提高检测概率。

### 1.3 频率步进波形宽带合成

对频率步进波形进行宽带合成，形成高分辨距离像，首先需要补偿速度带来的影响，否则会出现耦合时移与能量发散<sup>[15]</sup>。经过精确速度补偿后<sup>[16]</sup>的各子脉冲回波基带信号为：

$$x(t) = \sum_{i=0}^{N-1} \text{rect}\left(\frac{t-iT_r-\tau_0}{T_p}\right) \exp[j\pi K(t-iT_r-\tau_0)^2] \exp[j2\pi f_i(-\tau_0)] \quad (8)$$

经过子脉冲压缩后输出为：

$$y(t) = \sum_{i=0}^{N-1} A(t-iT_r) \exp[j2\pi f_i(-\tau_0)] \quad (9)$$

式中，子脉冲脉压后的加权幅值为：

$$A(t-iT_r) = \left| \left( 1 - \frac{|(t-iT_r-\tau_0)|}{T_p} \right) \text{sinc}\left\{ \pi K(t-iT_r-\tau_0)[T_p - |(t-iT_r-\tau_0)|] \right\} \right| \quad (10)$$

若 $f_i = f_0 + i\Delta f$ 满足步进规律，则可直接对子脉冲压缩后的结果式(9)，进行IFFT宽带合成处理，其物理意义为：频率步进波形的回波被看成是以 $\Delta f$ 为间隔，对总带宽 $\Omega = N\Delta f$ 的频谱进行的采样，则逆傅里叶变换后，得到了一维距离像。

$$y(n) = \sum_{i=0}^{N-1} A(t-iT_r) \cdot \exp[j2\pi(f_0 + i\Delta f)(-\tau_0)] \exp\left(j\frac{2\pi}{N}in\right) \quad (11)$$

进一步化简得：

$$|y(n)| = |A(t-iT_r)| \left| \frac{\sin[\pi(-l+n)]}{\sin\frac{\pi(-l+n)}{N}} \right| \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (12)$$

式中 $l = \text{Round}(N\Delta f\tau_0)$ ，Round为取整函数。

IFFT宽带合成处理后成像宽度为 $r_l = \frac{c}{2} \frac{1}{\Delta f}$ ，合成距离分辨率为 $r_n = \frac{c}{2} \frac{1}{N\Delta f}$ 。要求宽带合成处理的成像宽度大于单脉冲距离分辨率 $\frac{c}{2} \frac{1}{\Delta f} \geq \frac{c}{2} \frac{1}{B_p}$ ，即 $\Delta f \leq B_p$ ，否则成像结果会出现距离混叠现象。

若 $f_i$ 满足特定的编码规律，则通常按照频率步进规律对各子脉冲回波进行重新排列，再进行IFFT宽带合成处理。此时波形参数设计仍需要满足 $\Delta f \leq B_p$ ，保证重新排列后宽带合成成像结果不混叠。

## 2 参数设计与信号处理方法

### 2.1 参数设计

对于调频步进编码波形的参数设计，不仅需要抵消线性调频子脉冲距离速度耦合与脉间目标运动成像位置变化的影响，而且在进行宽带合成形成高分辨一维距离像后不存在距离混叠。

首先，需要满足各子脉冲脉压后，脉间成像位置偏差量最小，则由式(6)和式(7)得波形设计的代价函数为：

$$R_{\text{cost}} = \frac{c}{2} \left( \tau_0 - \frac{f_{mi}}{K_i} \right) + ivT_r - \frac{c}{2} \left( \tau_0 - \frac{f_{m0}}{K_0} \right) \quad (13)$$

若脉间目标位置相同，即距离速度耦合偏移与脉间运动的成像位置相互抵消，此时代价函数极小，化简得：

$$f_i = \frac{K_i}{K_0} f_0 - iT_r K_i \quad (14)$$

简化波形设计的复杂度，令各子脉冲带宽  $B_p$ 、脉冲持续时间  $T_p$ 、脉冲重复间隔  $T_r$  均不变，仅载频变化可得：

$$f_i = f_0 - iB_p \frac{T_r}{T_p} \quad (15)$$

即为调频步进编码波形所需满足的条件 1。

然而，由于  $|f_i - f_0| = \left| -iB_p \frac{T_r}{T_p} \right| > | -iB_p |$ ，直接进行 IFFT 宽带合成处理会出现成像混叠，因此通过设计多组频率步进波形的编码方式，从而在频率重排后满足  $\Delta f \leq B_p$  的宽带合成像不混叠条件 2。

波形设计算法需同时满足上述两个条件，可在雷达脉内参数确定的情况下通过公式搜索获得各子脉冲波形的载频变化规律，调频步进编码波形设计见图 1。分为多个组，同一组中相邻子脉冲间频率步进量满足脉压后目标出现位置相同的非相干积累条件，多组间频率步进量满足宽带合成高分辨率像的不混叠条件，实际雷达载频设计中多组间不混叠条件可进行冗余设计，以提高宽带合成系统的稳定性。所设计的波形针对非合作目标，未知速度时即可完成积累成像，提高信噪比，估计并补偿速度后，可进行宽带合成提高分辨率，从而提高识别性能。

## 2.2 信号处理

信号处理过程中，可对各子脉冲回波进行分组完成非相干积累与速度估计；补偿速度后，按照频率步进规律，对各子脉冲回波进行重新排列，完成宽带合成处理，从而形成高分辨率距离像。分为以下 4 步进行：

步骤 1：子脉冲脉压处理。根据式(6)，进行子脉冲脉压处理获得单脉冲距离像，与传统线性调频脉冲压缩处理方法相同。

步骤 2：非相干合成处理。参数设计中可知同一组中相邻子脉冲间频率步进量满足脉压后目标出现位置相同的积累条件，因此各组内进行非相干合成处理，获得信噪比较高的距离像。

步骤 3：回波速度补偿。利用包络相关法<sup>[17]</sup>或其他速度估计方法<sup>[18-19]</sup>，估计出不同组间的目标成像位置差异，从而利用式(17)估计目标运动速度。

第  $i$  组与第  $j$  组之间的目标成像位置差异为：

$$\Delta r = \left[ \frac{c}{2} \left( \tau_0 - \frac{f_{mi}}{K} \right) + ivT_r \right] - \left[ \frac{c}{2} \left( \tau_0 - \frac{f_{mj}}{K} \right) + ivT_r \right] = v \left[ \frac{f_i - f_j}{K} + (i-j)T_r \right] \quad (16)$$

从而得到目标运动速度为：

$$v = \frac{\Delta r}{\frac{(f_i - f_j)}{K} + (i-j)T_r} \quad (17)$$

对各子脉冲回波补偿速度项  $\exp \left[ \frac{j4\pi vf_i(t-\tau_i)}{c} \right]$  可以得到目标无速度情况下的各子脉冲回波。

步骤 4：宽带合成处理。对各子脉冲回波，按照频率步进规律重新排列，根据式(12)进行 IFFT 处理合成高分辨率一维距离像。

对于所设计的调频步进编码波形，整个信号处理过程可分为 2 个阶段：步骤 1 和步骤 2，信号处理无需获得目标速度，非相干积累得到的目标距离像，分辨率较低，若在此分辨率下能识别目标则无需进行步骤 3 和步骤 4 信号处理；步骤 3 和步骤 4，信号处理在一、二步基础上估计目标运动速度并合成高分辨率距离像，进一步用于目标的精细特征识别。所设计的波形与传统线性调频脉冲串波形相比，可以快速进行脉间积累提高信噪比，从而提高了测速精确度，同时宽带合成处理后提高了距离分辨率。

## 3 数值仿真分析

进行此调频步进编码波形的数值仿真实验，与恒定载频的线性调频波形比较，分析所提出波形脉间快速积累

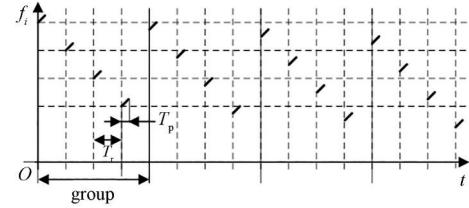


Fig.1 Sketch map of coded stepped frequency chirp waveform  
图 1 调频步进编码波形示意图

与合成高分辩距离像这两大优势，验证具体波形参数下，脉间积累与宽带合成效果，最终形成高分辨一维距离像。

雷达参数设计为：起始载频 $f_0=10$  GHz，相参处理时间内共有 $N_1 \cdot N_2=10 \times 4$ 个子脉冲，即含有 $N_2=4$ 组脉冲，每组脉冲内含为 $N_1=10$ 个子脉冲，子脉冲带宽 $B_p=100$  MHz，子脉冲脉宽 $T_p=100$   $\mu$ s，脉冲重复时间 $T_r=400$   $\mu$ s，采样频率设计为 $f_s=200$  MHz，脉压处理前信噪比 $R_{SN}=-20$  dB。可知，同一组中相邻子脉冲间频率步进量满足脉压后目标出现位置相同的非相干积累条件，即各阶载频为 $f_i=f_0-iB_pT_r/T_p$ ，相邻组间满足宽带合成距离像不混叠条件 $\Delta f \leq B_p$ 。此参数下调频步进编码波形的时频见图2。

设计2组数值仿真实验，实验1比较在相同参数下，调频步进编码波形与恒定载频线性调频波形的脉压成像序列，验证此调频步进编码波形可以在不补偿速度的情况下快速完成脉间积累，获得信噪比增益；实验2对此调频步进波形进一步处理，获得宽带合成后的高分辨一维距离像，并与单脉冲获得的距离像进行比较，验证宽带合成对成像分辨率的提高。

### 3.1 仿真实验1

设计存在2个目标，目标1具有两个散射点，相对位置为0 m与0.2 m，散射点强度均为 $1 \text{ m}^2$ ，速度为 $v_1=500$  m/s，远离雷达方向；目标2相对位置为-5 m，散射点强度为 $1 \text{ m}^2$ ，速度为 $v_2=-300$  m/s，靠近雷达方向。可知单脉冲分辨力为 $r_i=c/(2B_p)=3$  m，可以区分2个目标，但是不能区分目标1的2个散射点。画出调频步进编码波形与恒定载频线性调频波形的脉压成像序列图，见图3。

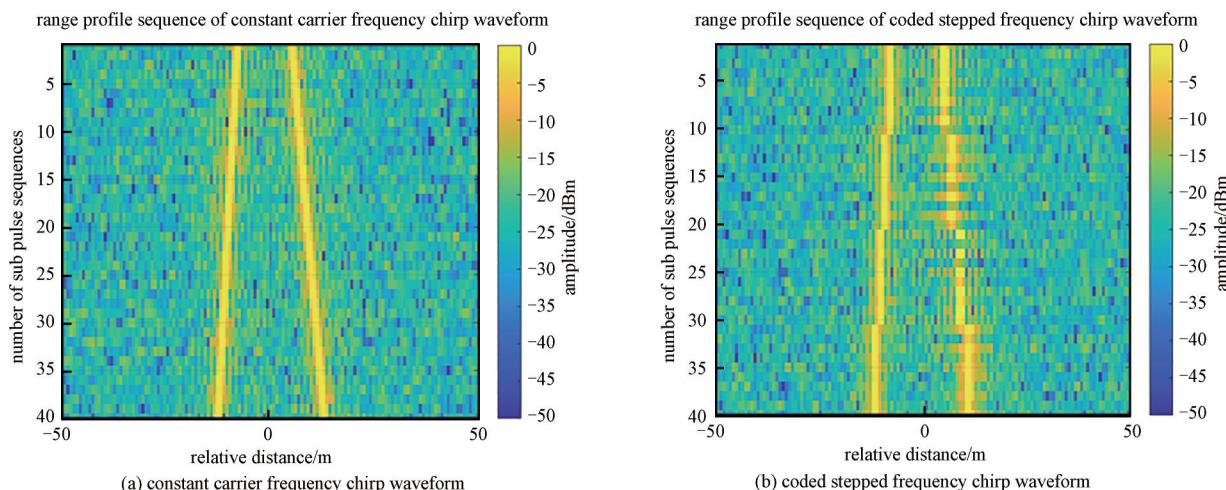


Fig.3 Range profile sequence of two waveforms  
图3 两种波形下脉压成像序列

可以看出恒定载频线性调频波形，每个子脉冲内目标出现的位置都不相同，需进行速度补偿后方可积累提高信噪比，而所设计的调频步进编码波形在同一组即 $N_1=10$ 脉冲内目标出现位置相同，无需目标速度信息即可进行非相干积累，第一组的积累成像见图4，红色实线为积累后的一维距离像，蓝线与绿线分别为第一组第1个子脉冲与第10个子脉冲的一维距离像，非相干积累有效提高了信噪比，信噪比提升量约为 $\sqrt{N_1} \approx 3.16$ 。

### 3.2 仿真实验2

仿真参数同仿真实验1，对调频步进编码波形进一步处理，获得宽带合成后的高分辨一维距离像。可知，调频步进编码波形单脉冲带宽为 $B_p=100$  MHz，分辨力为 $r_i=c/(2B_p)=1.5$  m，无法分辨两散射点；合成宽带为 $\Omega=N\Delta f=4$  GHz，距离分辨力为 $r_n=c/(2\Omega)=0.0375$  m，可以有效分辨两散射点。经过精确速度补偿后，所设计的调频步进波形单脉冲距离像与宽带合成距离像见图5。

可以看出，所设计的调频步进编码波形经过频率重排与IFFT宽带合成信号处理后，可以生成高分辨一维距

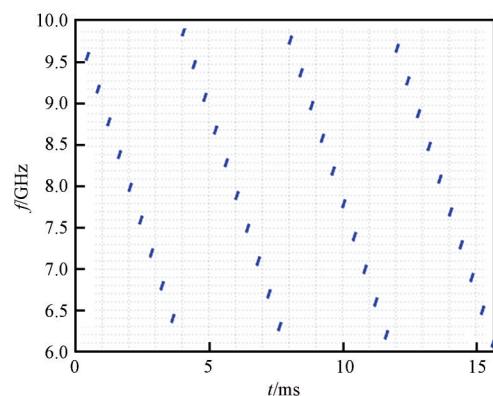
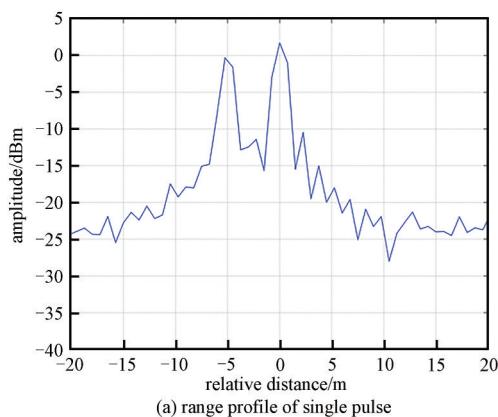


Fig.2 Time-frequency map of coded stepped frequency chirp waveform  
图2 调频步进编码波形时频图

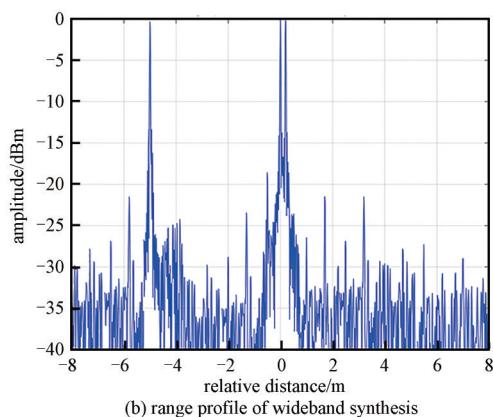
离像，有效分辨了目标 1 中距离较近的两个散射点，正确的脉间跳变频率量设置，使宽带合成距离像无距离混叠。宽带合成后距离分辨率提高倍数为  $\Omega/B_p=40$ 。

#### 4 结论

调频步进编码波形可以通过宽带合成获得高分辨一维距离像，而合适的脉间载频变化可以使线性调频子脉冲的距离速度耦合偏移量与脉间目标位移量抵消。本文通过波形设计来解决脉间的目标成像位置变化，提出了一种调频步进编码波形设计方法，有效利用载频变化特性，使得同一组内单脉冲成像的位置相同，多组综合后宽带合成距离像无距离混叠，数值仿真结果验证了所设计波形的有效性，针对速度未知的非合作目标探测成像具有一定的优势。



(a) range profile of single pulse



(b) range profile of wideband synthesis

Fig.5 Comparison of range profile before and after wideband synthesis

图 5 宽带合成前后距离像比较

#### 参考文献：

- [1] 毛二可,范花玉. 合成宽带脉冲多普勒雷达[J]. 系统工程与电子技术, 2016,38(12):2717–2724. (MAO Erke,FAN Huayu. Synthetic wideband pulse Doppler radar[J]. Systems Engineering and Electronics, 2016,38(12):2717–2724.)
- [2] AXELSSON S R J. Analysis of random step frequency radar and comparison with experiments[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007,45(4):890–904.
- [3] MAO Zhineng, WEI Yingsheng. Interpulse-frequency-agile and intrapulse-phase-coded waveform optimization for extend-range correlation sidelobe suppression[J]. IET Radar,Sonar & Navigation, 2017,11(10):1530–1539.
- [4] LIU Xionghou, SUN Chao. Low sidelobe range profile synthesis for sonar imaging using stepped-frequency pulses[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2017,14(2):218–221.
- [5] AUBRY A,CAROTENUTO V,MAIO D,et al. High range resolution profile estimation via a cognitive stepped frequency technique[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2018,55(1):444–458.
- [6] LYU Mingjiu,CHEN Liangdong,YANG Jun,et al. Non-linear stepped frequency waveform design method based on range ambiguity function [C]// IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing(ICSPCC). Xiamen,China:IEEE, 2017:22–25.
- [7] WANG Shengbin, XU Zhenhai, LIU Xinghua, et al. A novel scheme for detection and estimation of unresolved targets with stepped-frequency waveform[J]. IEEE Access, 2019,7(1):129018–129028.
- [8] LIAO Zhikun,LU Dawei,HU Jiemin,et al. Waveform design for random stepped frequency radar to estimate object velocity[J]. Electronics Letters, 2018,54(14):894–896.
- [9] LIAO Zhikun,HU Jiemin,LU Dawei,et al. Motion analysis and compensation method for random stepped frequency radar using the pseudorandom code[J]. IEEE Access, 2018,6(1):57643–57654.
- [10] LIU Yang,MENG Huai,ZHANG Hua,et al. Eliminating ghost images in high-range resolution profiles for stepped-frequency train of linear frequency modulation pulses[J]. IET Radar,Sonar & Navigation, 2009,3(5):512–520.
- [11] YANG Taoli,DONG Qi,HUANG Qihuang. A novel echo-based error estimation and ripple elimination method for stepped frequency chirp SAR signal[J]. IEEE Access, 2019,7(1):182839–182845.

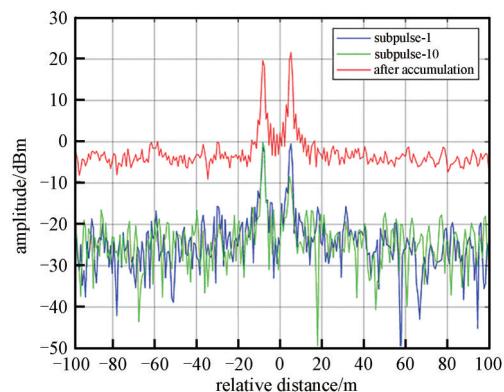


Fig.4 Range profile of pulses integration  
图 4 脉间积累成像图

- [12] LUO Xiulian,DENG Yunkai,WANG R,et al. Image formation processing for sliding spotlight SAR with stepped frequency chirps [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014,11(10):1692–1696.
- [13] 刘加方,张云华,董晓. 频率步进伪码-线性调频信号处理方法及成像[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(4):681–685. (LIU Jiafang, ZHANG Yunhua, DONG Xiao. Processing method of stepped PRBC-LFM signal and imaging[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019,17(4):681–685.)
- [14] WANG Sen,BAO Qinglong,CHEN Zengping. Range migration compensation for moving targets in chirp radars with stepped frequency[J]. Journal of Engineering and Technology, 2019,19(1):5553–5557.
- [15] 龙腾. 频率步进雷达信号的多普勒性能分析[J]. 现代雷达, 1996,18(2):31–37. (LONG Teng. Doppler performance analysis of frequency stepped radar signal[J]. Modern Radar, 1996,18(2):31–37.)
- [16] XIA Guifen,SU Hongyan,HUANG Peikang. Velocity compensation methods for LPRF modulated frequency stepped- frequency (MFSF) radar[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010,21(5):746–751.
- [17] 任丽香,龙腾,远海鹏. HPRF脉冲多普勒频率步进雷达信号处理与参数设计[J]. 电子学报, 2007,35(9):1630–1636. (REN Lixiang, LONG Teng, YUAN Haipeng. Signal processing and parameter design of HPRF pulsed Doppler stepped frequency radar [J]. Acta Electronica Sinica, 2007,35(9):1630–1636.)
- [18] 王其冲,马超,徐文韬. 多脉冲串步进频率信号相位斜率测速技术[J]. 现代雷达, 2019,41(8):33–37. (WANG Qichong, MA Chao, XU Wentao. A novel velocity measurement technique for multiple bursts stepped frequency signals with phase slope analysis[J]. Modern Radar, 2019,41(8):33–37.)
- [19] 吕明久,李少东,杨军,等. 基于全局最小熵的随机稀疏调频步进信号运动补偿方法[J]. 系统工程与电子技术, 2016,38(8):1744–1751. (LYU Mingjiu, LI Shaodong, YANG Jun, et al. Motion compensation method based on global minimum entropy for random sparse stepped frequency chirp signal[J]. Systems Engineering and Electronics, 2016,38(8):1744–1751.)

#### 作者简介：

张彦(1993-)，男，在读博士研究生，主要研究方向为雷达波形设计与特征提取。email:zoo1881@163.com。

鲁耀兵(1965-)，男，博士，研究员，主要研究方向为雷达系统总体设计。

叶春茂(1981-)，男，博士，研究员，主要研究方向为雷达系统设计与应用技术。

李璋峰(1989-)，男，博士，高级工程师，主要研究方向为雷达信号处理与目标识别。

(上接第768页)

- [10] 闫莉,方旭明. 高铁基于毫米波的自适应波束分合传输方案[J]. 电子与信息学报, 2016,38(1):146–152. (YAN Li, FANG Xuming. Adaptive beam splitting or integrating scheme for railway millimeter wave wireless communications[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016,38(1):146–152.)
- [11] CUI Yaping,FANG Xuming. A massive MIMO-based adaptive multi-stream beamforming scheme for high-speed railway[J]. Eurasip Journal on Wireless Communication and Network, 2015(1):1–8.
- [12] CUI Yaping,FANG Xuming,FANG Yuguang,et al. Optimal nonuniform steady mmwave beamforming for high-speed railway[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018,67(5):4350–4358.
- [13] LI Wenyu,ZHANG Chao,DUAN Xiaoyu,et al. Performance evaluation and analysis on group mobility of mobile relay for LTE advanced system[C]// IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall). Quebec City,QC,Canada:IEEE, 2012:1–5.
- [14] YUE Dianwu,ZHANG Yan,JIA Yanan. Beamforming based on specular component for massive MIMO systems in Ricean fading [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2015,4(2):197–200.
- [15] YOO T, GOLDSMITH A. On the optimality of multiantenna broadcast scheduling using zero-forcing beamforming[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006,24(3):528–541.
- [16] HUANG Shengchun,YIN Hao,LI Haoming,et al. Decremental user selection for large-scale multi-user MIMO downlink with zero-forcing beamforming[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2012,1(5):480–483.

#### 作者简介：

黄高勇(1980-)，男，博士，讲师，主要研究方向为轨道交通无线通信关键技术。email:huanggaoyong@163.com。

郑添(1995-)，男，硕士，主要研究方向为轨道交通无线通信关键技术。

方旭明(1962-)，男，博士，教授，博士生导师，主要研究方向为下一代移动通信系统和轨道交通移动通信关键技术。email:xmfang2002@163.com。